ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 19, pp11.19-11.30, 2015. Impreso en la Argentina
ISSN 2314-1433 - Trabajo selecionado de Actas ASADES2015

COMPARACIÓN DE FUENTES SATELITALES, DE RE-ANÁLISIS Y MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL MAPEO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL VALLE DE LERMA (SALTA-ARGENTINA).

L. Ramirez Camargo[1], M. Altamirano[2], S. Belmonte[3], W. Dorner[4]
Applied energy research group, Technologie Campus Freyung - Technische Hochschule Deggendorf
Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) centro de investigación y desarrollo - Salta
Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO) - Universidad Nacional de Salta
Grafenauer Str. 22 94078 Freyung, Germany
Tel. +49 (0)8551 91764-28. E-mail: luis.ramirez-camargo@th-deg.de

Recibido 03/09/15, aceptado 05/10/15

RESUMEN: La radiación solar global es el factor más importante para la determinación del potencial de producción de energía de plantas fotovoltaicas y otras aplicaciones de energía solar. En la Argentina los datos de radiación solar global medidos en tierra son escasos o inaccesibles para el público en general. En muchos casos se recurre a métodos estadísticos o imágenes satelitales para proporcionar un aproximado de la radiación solar global en alguna locación deseada en el país. En el presente trabajo se busca determinar una fuente de datos de radiación solar global para el valle de Lerma con la mejor resolución temporal y espacial posible. Con este fin se estudian los datos de radiación de re-análisis ERA-INTERIM del "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" (ECMWF) y los proporcionados por la "Land Surface Analysis Satellite Applications Facility" (LSA-SAF) que son generados a partir de imágenes de MeteoSat de segunda generación (MSG). Estos datos son comparados entre ellos, con mapas generados por técnicas estadísticas y mediciones de un piranómetro. Los resultados demuestran que los valores LSA-SAF presentan un mejor ajuste a las mediciones en terreno y por su alta resolución espacial y temporal se convierten en una alternativa satisfactoria para compensar la escasa disponibilidad de datos para el área de estudio.

Palabras clave: radiación solar global, ECMWF, LSA-SAF, imágenes satelitales, comparación

INTRODUCCIÓN

En el marco del proyecto "Planificación Energética Territorial con Fuentes Renovables de Energía: Datos, metodologías, modelos y procesos de participación en los casos Argentino y Alemán" financiado por el Ministerio Federal Alemán para la Educación y la Investigación (BMBF) y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MinCyt) Argentino y desarrollado en cooperación entre el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) de Salta y el grupo de investigación aplicada en temas energéticos del Technologie Campus Freyung de la Universidad de Ciencias aplicadas de Deggendorf, se busca, entre otros temas, hacer una comparación entre los datos usados y necesarios para hacer planificación energética territorial en ambos países. En este sentido, uno de los primeros asuntos que se identificó es que en el caso alemán se tiene acceso a datos de radiación solar en una alta resolución espacial y que, aunque dista de ser óptimo, existen variadas metodologías y/o servicios para obtenerlos, mientras que en la Argentina la disponibilidad de estos datos es mucho más limitada.

[1] Investigador Technologie Campus Freyung
[2] Profesional del INTI
[3] Investigador CONICET
[4] Director Technologie Campus Freyung y Prof. Technische

Los datos de radiación solar en una alta resolución espacial y temporal son utilizados en zonas que están alejadas de estaciones meteorológicas tanto para optimizar instalaciones fotovoltaicas individuales de autoconsumo, como para optimizar los ingresos de plantas conectadas a la red (que funcionan bajo tarifas cambiantes en el tiempo) y para diseñar sistemas distribuidos de producción de energía con altos porcentajes de penetración de fotovoltaicos. Distribuir plantas fotovoltaicas en regiones extensas contribuye a disminuir la variabilidad de un sistema interconectado a base de fotovoltaicos, y por ende, los requerimientos de infraestructura de soporte y almacenamiento energético para compensar los picos y los bajones en la producción (Hoff y Perez, 2010, 2012). Esta aplicación se repite en áreas tan pequeñas como municipalidades (aunque en una menor magnitud), donde además las estimaciones en alta resolución espacio-temporal sirven para determinar los limites técnicos sensatos de la capacidad instalada de plantas fotovoltaicas en sistemas energéticos que funcionen mayoritariamente con energías renovables (Ramirez Camargo et al., 2015; Ramirez Camargo et al., 2015).

Mapeo de la radiación solar en Argentina

La importancia del recurso solar y la escasez de mediciones para la determinación de su disponibilidad en términos de radiación solar global en el territorio argentino son temas que han acompañado a la comunidad científica de este país al menos desde los años 1970. Righini y Grossi Gallegos (2000) reportan el desarrollo de los primeros mapas de radiación solar para el país. Los trabajos descritos por estos autores van desde las cartas de irradiación solar global mensual y anual de Crivelli y Pedregal (1972) construidas en base a correlaciones entre la heliofanía relativa y la irradiación global medida localmente hasta las cartas de isolíneas de radiación para todo el país desarrolladas por Grossi Gallegos (1998), que fueron construidas a partir de mediciones de la red solarimétrica y métodos estadísticos. Mejoras a estas cartas fueron hechas por Righini y Grossi Gallegos (2003) y Righini, Grossi Gallegos y Raichijk (2005). Sin embargo, la escasa cantidad de puntos de medición usados para su construcción hace que estas cartas sean todavía insatisfactorias en cuanto a su resolución espacial, lo cual es especialmente cierto para regiones de topografía complicada como lo es el noroeste argentino (Laspiur et al., 2013; Salazar et al., 2013). Con la idea de mejorar la disponibilidad de mediciones en tierra, en 2012 se desarrolló un plan denominado Sistema Argentino de Evaluación de Energía Solar (ENARSOL), para establecer una nueva red de 40 estaciones que estén en capacidad de medir radiación solar global, directa y difusa (Aristegui y Righini, 2012). Esta red se encuentra aún en construcción (INTA, 2015) y tendrá que pasar tiempo hasta que se obtengan series temporales suficientes para validar otras fuentes de información que permitan mejorar las cartas de radiación existentes.

Una alternativa para las mediciones en tierra y los procedimientos estadísticos para derivar cartas de radiación solar es la utilización de imágenes satelitales. Frulla y et al. (1988) son los pioneros en usar imágenes satelitales para estimar radiación solar en la superficie del territorio argentino. Los autores comparan valores de radiación solar incidente derivados de imágenes del satélite GOES con mediciones en tierra para los años 1982 y 1983 en el norte del país. Once años después Grossi Gallegos (1999) hace una nueva comparación de datos en tierra con valores derivados de imágenes satelitales pero en este caso haciendo uso del “Surface Solar Energy (SSE) data set” versión 1.0 que tiene una resolución de aproximadamente 280Km x 280Km. Este ejercicio es repetido 10 años después por Raichijk (2009) con una versión moderna de los datos, el “Surface Radiation Budget (SRB) Project-REL3.0”, que tiene una mejor resolución espacial (aproximadamente 100Km x 100Km) y para el que hay una serie de tiempo más larga que en el estudio anterior (1992-2005). El SSE vuelve a ser utilizado por Salazar y et al. (2013) pero los resultados del estudio lo muestran como una alternativa inferior comparada con los datos obtenidos del “Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)” para un estudio en el noroeste argentino. Este última fuente de datos no sólo presenta una mejor resolución espacial (40Km x 40Km), sino que además los valores de radiación presentan mejores estadísticas cuando son comparados con mediciones en tierra (Salazar et al., 2013). Aparte de estos estudios, el uso de imágenes provenientes de las diferentes generaciones de satélites GOES se ha consolidado en el ámbito argentino de investigación. Entre estos estudios se cuentan los de Righini (2004), Ceballos y et al. (2005), Righini y Barrera (2008), Ceballos y et al. (2011) y Taddei y et al. (2014). Para los últimos de estos estudios las imágenes satelitales cuentan con resoluciones espaciales muy superiores a la de los pioneros en 1988 con valores que llegan a los 2Km x 2Km y la periodicidad

de los datos llega hasta horas, aunque las comparaciones se siguen haciendo en general para valores diarios o días promedios mensuales. Sin embargo, fuentes de datos de acceso libre que son populares en el ámbito internacional y que también cubren enteramente o en buena parte el territorio argentino, como los datos de re-análisis ERA-INTERIM del "European Centre for Medium-Range Weather Forecasts" (ECMWF) con resolución temporal de al menos 3 horas y espacial de aproximadamente 11Km x 11Km o los datos de la "Land Surface Analysis Satellite Applications Facility" (LSA-SAF) derivados de imágenes Meteosat de segunda generación con resolución temporal de 30 minutos y espacial de aproximadamente 3Km x 3Km, están ausentes en la literatura científica que concierne a radiación solar a nivel nacional.

Por otra parte, los estudios donde se usan datos en una alta resolución temporal se concentran alrededor de la evaluación de calidad de datos obtenidos en una cierta locación y la validación de modelos para la estimación puntual de radiación solar a partir de otros parámetros. Ejemplos actuales son los trabajos de Raichijk (2012), Raichjk y Taddei (2012) y Sayago y et al. (2011). En el primero de estos trabajos se define un procedimiento de control de calidad para una base de datos horarios simultáneos de radiación solar global, difusa y directa haciendo uso de datos de la estación solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján para un período de un año y medio. En el segundo, se usan los mismos datos para comparar 12 modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria, y en el tercero los autores hacen uso de modelos basados en redes neuronales para predecir radiación solar global que es comparada con datos horarios de una estación en la localidad de Córdoba. La excepción a la regla es el estudio de Taddei y et al. (2014) donde se comparan datos de radiación horaria calculados con la metodología Heliosat-2 en base a imágenes de GEOS con datos de mediciones para nueve estaciones en la Pampa Argentina. Sin embargo estos autores hacen la comparación únicamente para los datos del mes de diciembre del año 2013 y presentan resultados únicamente para dos de las estaciones.

Alcance del trabajo

En este trabajo se busca determinar una fuente de datos de radiación solar global para el Valle de Lerma en la mejor resolución temporal y espacial posible, que sirva para futuros estudios del potencial de generación de energía de plantas fotovoltaicas y otras aplicaciones de energía solar. Para cumplir con este fin se estudian dos fuentes de datos que son usadas por primera vez en el contexto argentino y que ofrecen largas series de tiempo de datos de radiación solar en resoluciones espaciales del orden de los mejores datos que han sido usados en la literatura científica hasta la fecha y con una resolución temporal que llega a los 30 minutos.

El documento está organizado de la siguiente manera: en la siguiente sección se presenta el área de estudio. En la tercera sección se describen los conjuntos de datos que van a ser comparados y los datos que son usados como referencia. En la cuarta sección se describe la metodología para la comparación de los datos y se presentan los resultados de la misma. La sección cinco está dedicada a la discusión de los resultados y la última sección cierra el documento con las conclusiones.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es el Valle de Lerma que es un área en la provincia de Salta (Argentina) comprendida entre las siguientes coordenadas (en lat/long WGS84): Este: 65:15:09.823778 oeste, Oeste: 65:48:10.319053 oeste, Norte: 24:22:27.793034 sur, Sur: 25:43:34.945115 sur. Un Modelo Digital de Elevación (MDE) del Valle de Lerma con una resolución de 90m x 90m se presenta en la Figura 1. Como se puede observar, existen grandes diferencias en altitud, con valores que varían entre 930 y 5400 m.s.n.m. En el Valle de Lerma se reconocen dos sectores principales: área de valle propiamente dicho y sector montañoso. Una descripción detallada de esta zona geográfica se puede encontrar en Belmonte y et al. (2009).

La definición del área de estudio Valle de Lerma para la comparación de estimaciones de radiación solar se basó principalmente en la existencia de antecedentes específicos y capas temáticas disponibles para el análisis del recurso solar (cartografía digital de Belmonte, 2009; Belmonte et al., 2006; Belmonte et al., 2009).

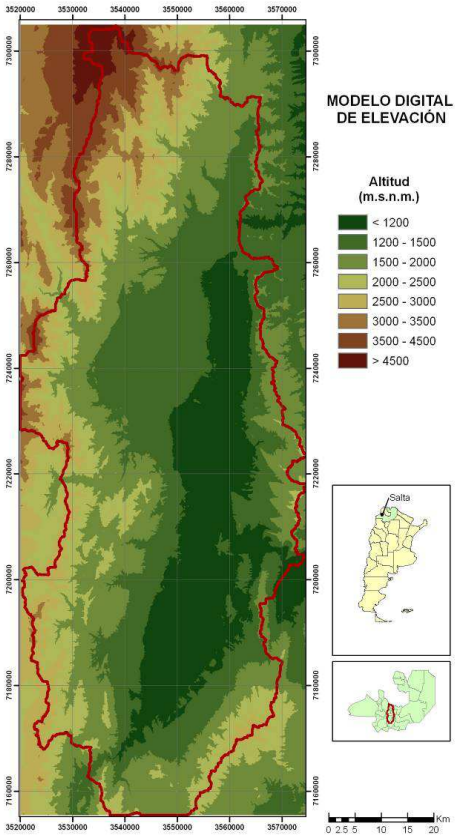

Figura 1: Modelo Digital de Elevación del Valle de Lerma, vista en planta. Fuente: Belmonte (2009). Generado a partir de datos de la NASA reportados en Jarvis et al. (2008).

CONJUNTOS DE DATOS

Cuatro conjuntos de datos fueron usados para el desarrollo del presente trabajo: a) Datos de re-análisis producidos por el ECMWF; b) Datos derivados de imágenes satelitales de MSG generados por la LSA-SAF; c) Cartas de radiación encontradas en la literatura que fueron generadas por medio de métodos estadísticos; d) Mediciones de un piranómetro. Los datos básicos de cada fuente están resumidos en la Tabla 1. Una descripción detallada de los datos provenientes del ECMWF y de la LSA-SAF se pueden encontrar en Roerink y et al. (2012). La descripción completa de las mismas se encuentra en las páginas web de las respectivas instituciones (http://landsaf.meteo.pt/ y http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim). Para evitar repeticiones innecesarias en el presente documento sólo se hará una descripción breve de estos datos.

Fuente	**Metodos estadísticos**	**Imágenes satelitales MSG**	**Datos de re-análisis ERA-INTERIM**	**Mediciones en la UNSa**
Tipo de producto	Radiación solar global	Down-welling Surface shortwave flux (DSSF)	Surface Solar Radiation Downwards (SSRD)	Radiación solar global
Proveedor	Belmonte (2009) - Universidad Nacional de Salta	Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LSA SAF)	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	Dr. Germán Ariel Salazar
Resolución espacial	90 m	Aprox. 3 Km	Aprox. 14 Km en el ecuador y aprox. 11 Km en el área de estudio	Puntual
Resolución temporal	Día promedio por mes	30 minutos	3 Horas	1 minuto
Unidades de referencia	$MJ*m^{-2}$	$W*m^{-2}$	$J*m^{-2}$	$W*m^{-2}$
Formato de los datos	GeoTiff	HDF5	NetCDF	csv

Tabla 1. Resumen de las características de los datos utilizados en el análisis.

a) "Down-welling Surface shortwave flux" (DSSF) derivados de MSG por la LSA-SAF

Este producto corresponde al estimado de radiación solar global calculado a partir de imágenes del sensor SERIVI instalado en la plataforma geoestacionaria MSG. EL DSSF es calculado haciendo uso de un algoritmo desarrollado por Météo-France que es actualizado desde 2004 (LandSAF, 2010). Geiger y et al. (2008) presentan la primera validación del producto para datos horarios usando datos de 6 estaciones europeas de medición en tierra con una variación estándar de las diferencias en un rango entre 40 W m^{-2} y 110 W m^{-2} y con sesgos absolutos de 10 W m^{-2} o menos. Validaciones posteriores de los datos diarios se encuentran por ejemplo en Roerink y et al. (2012). Los datos están disponibles en una escala temporal de 30 minutos desde 2005 hasta la fecha para cuatro regiones diferentes: Europa, África del Norte, África del Sur (debajo del Ecuador) y una parte de Suramérica.

b) "Surface Solar Radiation Downwards" (SSRD) parte de los datos de re-análisis ERA-INTERIM del ECMWF

Los datos SSRD forman parte del último re-análisis de la atmósfera global realizado por el ECMWF y llamado ERA-INTERIM. Éste va desde 1989 hasta la fecha y continúa en tiempo real. Cubre la faz de la tierra con una resolución espacial de 0.7° x 0.7°en 60 capas atmosféricas y entrega mejores predicciones que re-análisis previos como ERA-40. Los datos pueden ser descargados en formatos GRIB o NetCDF y los valores están guardados como la cantidad de radiación solar que llega a la atmósfera, acumulada desde el principio de cada período de predicción (el cual corresponde con los días de calendario).

c) Cartas de radiación solar para el Valle de Lerma

Las primeras cartas de radiación para el Valle de Lerma fueron desarrolladas por Belmonte y et al. (2006). Las mismas tienen una resolución espacial de 90 m x 90 m y contienen valores de radiación solar global de día claro acumulada para un día promedio de cada mes del año en MJ/m^2. Los valores contenidos en estas cartas fueron calculados mediante la aplicación de regresiones estadísticas entre altitud, latitud, registros puntuales de radiación solar incidente y datos de radiación estimados con el programa Geosol. Los parámetros geográficos de entrada para los cálculos en Geosol y para las regresiones fueron determinados con soporte en el Modelo Digital de Elevación generado a partir de datos de la NASA. Estos mapas fueron también presentados en Belmonte y et al. (2009) y posteriormente ajustados para condiciones de cielo real haciendo uso de un índice de claridad diario, el cual fue determinado con mediciones de tres estaciones que se encuentran en la ciudad de Salta (Belmonte, 2009). Estos últimos 12 mapas mensuales, con la radiación solar bajo condiciones de cielo real fueron proporcionados directamente por la autora en formato Geotiff georreferenciadas bajo el EPSG 22183.

d) Mediciones en terreno

Las mediciones se realizaron en la Universidad Nacional de Salta (latitud -24,72861111 y longitud -65,40944444) con un piranómetro PSP Eppley y los datos fueron tomados cada minuto con un data-logger Cambel CR1000. Estas mediciones fueron financiadas por el proyecto de investigación Nº 1988/3 del C.I.U.N.Sa "Medición y análisis de los componentes de la radiación solar en sitios de altura de Salta para su uso en la optimización del funcionamiento de grandes sistemas concentradores térmicos" dirigido por el Dr Germán Ariel Salazar.

OBTENCIÓN, COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS DATOS

Metodológicamente se realizaron los siguientes pasos: 1. Los datos fueron descargados de las distintas fuentes y pre-procesados para poder ser comparados; 2. Se realizó un análisis descriptivo de los valores de radiación acumulada diaria de las cartas de ECMWF y LSA-SAF[5]; 3. Se utilizaron las series de tiempo de 2013 y 2014 de estas fuentes para generar mapas de radiación de días promedios

[5] Para evitar confusiones, los datos asociados a estas fuentes de información serán citados en todo el trabajo con las siglas ECMWF - LSA-SAF, si bien se sobreentiende que corresponden a datos SSRD y DSSF respectivamente, como fueron antes especificados.

mensuales y se compararon con los mapas de Belmonte (2009). 4. Por último, se compararon las series de tiempo de ECMWF y LSA-SAF con las mediciones del piranómetro en una resolución temporal de treinta minutos para el año 2014.

1. Descarga y pre-procesamiento de datos

El primer paso fue la obtención de los datos y su transformación en formatos, resoluciones y unidades comunes que permitan una comparación. Los datos de LSA-SAF para cada media hora para los años 2013 y 2014 fueron descargados en paquetes de 1,000 mapas para la parte del disco correspondiente a Suramérica a través del formulario web y el ftp de la LSA-SAF. De los 17,520 mapas que se deberían obtener por cada año se obtuvieron 17,109 para 2013 y 17,252 para 2014. En ambos años hacen falta 4 días enteros de datos y el resto de mapas faltantes están distribuidos de forma irregular durante todo el año. Los datos del ECMWF se descargaron únicamente para el área del Valle de Lerma en la mejor resolución espacial disponible (0.125° x 0.125°) y con una resolución temporal de 3 horas. Por las características de estos datos el número de mapas descargados es exactamente igual al esperado. Los formatos de datos HDF5 y NetCDF fueron transformados en Geotiff, los mapas se georreferenciaron y transformaron al código EPSG 22183 ("POSGAR 94 / Argentina 3") usando GDAL. Todos los mapas fueron importados en GRASS GIS y registrados en bases de datos espacio-temporales independientes. Los mapas de Belmonte (2009) y del ECMWF fueron transformados a Wh/m^2 usando el módulo para operaciones matemáticas en mapas raster de GRASS GIS. Todos los mapas disponibles fueron transformados a una resolución espacial de $90m^2$, que corresponde a la resolución de los datos de Belmonte (2009) y que es la máxima resolución de las tres fuentes de mapas. Esto se decidió con el fin de no añadir error debido a la interpolación de un alta a una baja resolución, lo que sería necesario para trabajar con las resoluciones de origen de las otras fuentes.

2. Comparación de los datos de energía solar acumulada por día de las cartas ECMWF y LSA-SAF

Para determinar el agregado de energía solar por día se sumaron todos mapas de la LSA-SAF por día asumiendo que la radiación instantánea en W/m^2 permanece inalterada para cada período de media hora. En el caso del ECMWF, debido a que los datos ya están agregados de período a período durante un día, sólo fue necesario seleccionar el mapa con los valores máximos por día. Posteriormente se calculó la diferencia simple entre cada uno de los mapas de las series de tiempo diarias de los años 2013 y 2014 de las dos fuentes. A continuación se calcularon estadísticas descriptivas de cada una de las series de tiempo, es decir provenientes de LSA-SAF, ECMWF y de las diferencias. Las Figuras 2 y 3 presentan las series de tiempo del valor promedio, mínimo, máximo y la desviación estándar de la radiación solar global total por día para los años 2013 y 2014 de los mapas para el Valle de Lerma provenientes de ECMWF y LSA-SAF respectivamente. El valor promedio es presentado en azul mientras el rango entre el valor mínimo y máximo es presentado en azul con un nivel de transparencia de 90%. La línea negra presenta la desviación estándar.

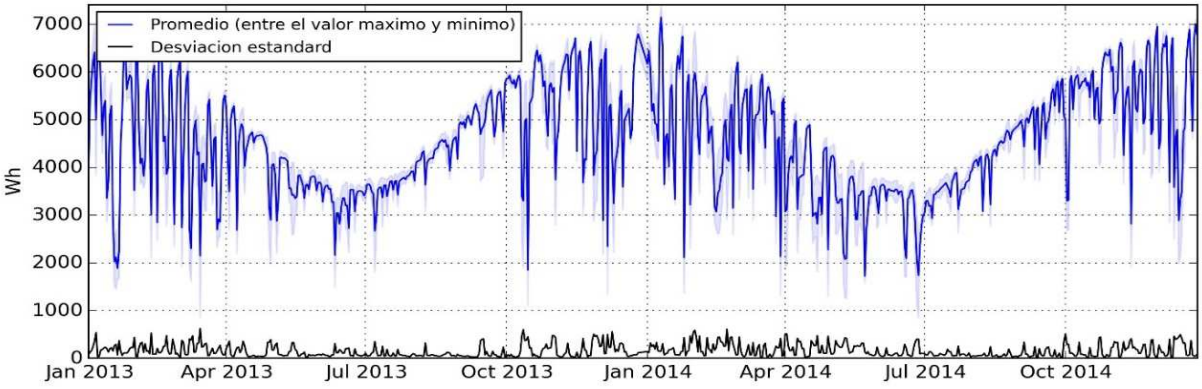

Figura 2: Serie de tiempo de estadísticas descriptivas para los valores de los mapas de radiación global total por día en el Valle de Lerma generados a partir de los datos del ECMWF.

Los datos de la LSA-SAF presentan no sólo una variabilidad mucho más alta por mapa entre los valores máximos y mínimos por píxel, sino que en general los valores promedio son superiores a los

del ECMWF. Lo primero también se ve reflejado en la desviación estándar que en el caso del LSA-SAF tiene un máximo de 2,968 Wh y el 75% de los datos se concentran bajo 554 Wh mientras que para el re-análisis ECMWF estos valores llegan únicamente a 626 Wh y 231 Wh respectivamente. Sin embargo al momento de revisar el promedio y la desviación estándar de las diferencias, los mapas de radiación acumulada parecen ser bastante similares. El promedio general del píxel promedio de la diferencia por mapa es 12 Wh y la desviación estándar correspondiente llega apenas a 31Wh.

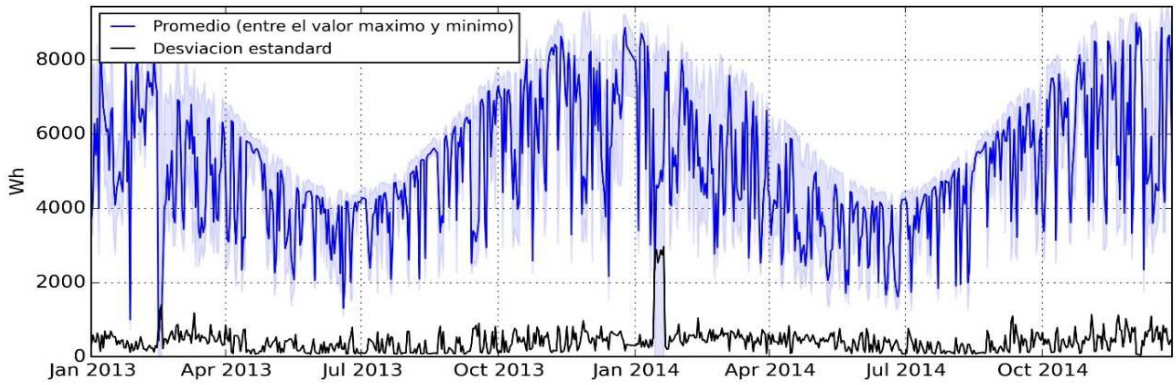

Figura 3: Serie de tiempo de estadísticas descriptivas para los valores de los mapas de radiación global total por día en el Valle de Lerma generados a partir de los datos de la LSA-SAF.

3. Comparación de las cartas de días promedios mensuales de energía solar acumulada diaria

Para hacer la comparación con los mapas de días promedios de radiación por mes de Belmonte (2009) se seleccionó el mapa promedio para cada mes de los datos de ECMWF y LSA-SAF. Siguiendo el trabajo de Righini y et al. (2014) debería bastar con los datos de dos años de mediciones para determinar los días promedio de radiación de cada mes para esta parte del país. Así que el día promedio de cada fuente se determinó usando los valores diarios por mes de los años 2013 y 2014 para cada fuente de datos. Los mapas resultantes fueron comparados entre sí y con los mapas de Belmonte (2009) por medio del cálculo de una diferencia porcentual. La Figura 4 muestra cartas de diferencia mínima, máxima y promedio de los valores mensuales para las tres fuentes. Las cartas están presentadas sin georreferenciación y por tanto los ejes de las imágenes representan la cantidad de píxeles de cada eje. Las diferencias entre los días típicos de cada mes de LSA-SAF y ECMWF confirman lo observado con los datos diarios. Por una parte se ve que la mayoría de los píxeles de la diferencia entre estos dos conjuntos de datos para 8 de 12 meses tienen valores positivos (LSA-SAF mayor que ECMWF). Por otra parte en general los datos son bastante similares y los casos en que los datos del ECMWF son superiores a los del LSA-SAF son reducidos y están concentrados en 4 meses del año para el área noroeste de los mapas. Las cartas de diferencia de los datos de ECMWF y Belmonte (2009) muestran resultados cercanos a cero para la parte con menor altura sobre el nivel del mar del valle y diferencias más grandes para las zonas montañosas para casi todos los meses del año menos para el mes de marzo. Esta regularidad se pierde cuando se comparan los datos de la LSA-SAF con los datos de Belmonte (2009), ya que hay un balanceado número de cartas mensuales donde las diferencias son más grandes para las zonas montañosas y otras para las zonas bajas. En general, vale la pena mencionar que a pesar de algunos píxeles atípicos, los valores de LSA-SAF son más cercanos a los de Belmonte (2009) que los de ECMWF. Finalmente, el LSA-SAF tiene valores superiores a los de Belmonte (2009) para la mayoría de los meses del año mientras que los valores del ECMWF tienden a ser menores.

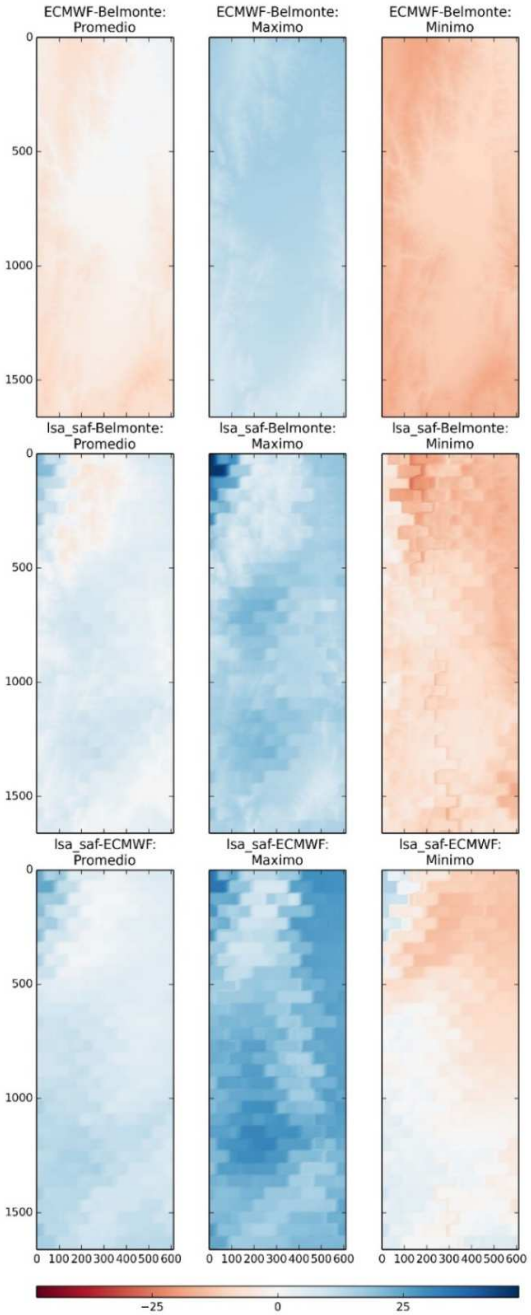

Figura 4: Mapa de promedio, valores mínimos y valores máximos de la diferencia porcentual en la energía solar acumulada entre los mapas de día promedio de cada mes para todo el año para los siguientes sets de comparaciones: ECMWF-Belmonte (arriba), LSA-SAF-Belmonte (medio), LSA-SAF-ECMWF (abajo).

4. Validación de los datos de ECMWF y LSA-SAF para una locación en el área de estudio

Por último, se compararon las series de tiempo en una resolución de 30 minutos de los datos de LSA-SAF y ECMWF con los registros del piranómetro ubicado en la Universidad de Salta (zona centro-norte del Valle de Lerma). Los datos en minutos registrados por el mismo fueron promediados para cada media hora. Los datos de ECMWF y LSA-SAF fueron extraídos para el píxel correspondiente a la locación del piranómetro usando el paquete de manejo de series espacio-temporal de GRASS GIS. Los datos del ECMWF se desagregaron de 3 horas a 30 minutos usando el paquete para manejo de bases de datos PANDAS del lenguaje de programación Python.

Las series de tiempo de valores cada 30 minutos para el año 2014 fueron comparadas con los datos del piranómetro por medio de 7 de 10 indicadores identificados por Inman, Pedro y Coimbra (2013) como los regularmente usados para evaluar la capacidad de modelos para predecir valores de radiación solar.

Los indicadores incluyen el coeficiente de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE), el coeficiente de correlación de Pearson (ρ), el error cuadrático medio (RMSE), el sesgo medio (MBE), el error absoluto medio normalizado por el valor promedio de la irradiancia (MAE/promedio) y el error cuadrático medio normalizado por el máximo valor nominal o capacidad de irradiancia (RMSE/Capacidad). Los indicadores se encuentran descritos en detalle en las ecuaciones 12 a 20 en Inman y et al. (2013). Adicionalmente fueron calculados el error cuadrático medio relativo RMSE% y el sesgo medio relativo MBE% que son comunes en la literatura científica argentina, siguiendo la descripción de Raichijk (2009). Los indicadores para los datos de LSA-SAF y ECMWF cuando son calculados en relación a las mediciones del piranómetro como datos de referencia se presentan en la Tabla 2.

Datos\ Indicador	R^2	**MAE**	ρ	***RMSE***	**MBE**	**MAE/ promedio**	**RMSE/ Capacidad**	**RMSE %**	**MBE %**
LSA-SAF	0.81	56.11	0.90	121.2	15.22	0.29	0.12	62.76%	9.33%
EMWCF	0.75	72.49	0.87	136.8	21.69	0.37	0.13	70.80%	13.3%

Tabla 2. Indicadores de la capacidad de predicción de los datos de LSA-SAF y ECMWF en relación a las mediciones del piranómetro.

En la tabla de indicadores se puede observar que en todos y cada uno de los casos, los datos de LSA-SAF presentan mejores resultados que los datos de ECMWCF. Las medidas de dispersión MAE, RMSE, al igual que sus versiones normalizadas, MAE/Promedio y RMSE%, RMSE/Capacidad, muestran que los valores de radiación de LSA-SAF están más cerca de los valores de la medición en tierra. Además, el sesgo medio y el sesgo medio relativo son positivos en ambos casos pero son más pequeños para los datos de LSA-SAF. Consecuentemente los coeficientes de correlación y de determinación son mayores para los datos de LSA-SAF. Éste último fue calculado asumiendo una regresión aplicando mínimos cuadrados ordinarios donde la hipótesis nula de los test f y t se puede rechazar con un nivel de confianza del 99% tanto para los datos de LSA-SAF como para los de ECMWF. También vale la pena notar que aunque los indicadores son mejores para el LSA-SAF, los datos del ECMWF adaptados con la metodología presentada no se encuentran muy alejados. En casos como el de la RMSE/Capacidad, que es la medida de dispersión más recomendada por Hoff y et al (2013), y el MBE% no hay sino 1% de diferencia entre los resultados de los dos conjuntos de datos cuando son comparados con los datos del piranómetro.

DISCUSIÓN

Los mapas diarios de energía solar acumulada de LSA-SAF presentan una mayor variabilidad entre valores mínimos y máximos que no sólo es explicada por la mayor resolución espacial, que está en capacidad de captar por lo menos en parte las variaciones en radiación debida a los fuertes cambios en la topografía, sino también en cierta medida por la irregularidad de los datos (imágenes faltantes o errores en ellas). Este último caso es inexistente para los datos de ECMWF, ya que el modelo numérico genera resultados para todos los píxeles en todas las imágenes. El hecho que las diferencias entre los dos conjuntos de datos sean pequeñas abre la posibilidad de hacer uso de datos del ECMWF para completar las series de tiempo de radiación acumulada diaria basada en los datos de LSA-SAF en caso de que sean necesarias.

Los valores de energía solar acumulada para los días promedio mensuales de LSA-SAF son más cercanos a los de Belmonte (2009) que los de ECMWF, aunque las diferencias entre ambos no son muy grandes. No existen datos “ciertos” para comparar con las tres fuentes pero la similitud entre ellas y el hecho que diferencias de más de 10% sean sólo para algunos píxeles irregulares, lleva a pensar que la elección entre las mismas será más un asunto de construcción de escenarios. Investigadores interesados en hacer una estimación optimista de generación de energía en base a energía solar deberían optar por usar los datos de la LSA-SAF, para estudios más conservadores los datos del ECMWF serían más adecuados. En caso de que el factor relevante sea la resolución espacial y sólo se necesiten días promedios mensuales de radiación, serían los mapas de Belmonte (2009) la fuente de datos a elegir.

Del análisis de los indicadores queda clara una preferencia por LSA-SAF en relación a ECMWF, pero la pregunta que queda abierta es qué tan buenos son esos indicadores en general. Hacer una comparación con la literatura científica nacional argentina es complicado puesto que el único estudio conocido por los autores que tienen características comparables es el de Taddei y et al. (2014). En este documento se reportan RMSE% y MBE% pero no se especifica cómo fueron calculados. Asumiendo que Taddei y et al. (2014) calcularon el mismo MBE%, los valores alcanzados son similares a los reportados en este trabajo (10% vs 9.33%). Para el caso del RMSE% las diferencias son muy amplias en relación a los datos de Taddei y et al. (2014). El problema es que no hay un punto real de comparación puesto que este indicador depende de la cantidad de observaciones, y mientras nosotros calculamos un RMSE% para más de 34,000 datos Taddei y et al. (2014) lo hacen máximo para 22. Un indicador independiente del número de observaciones como lo es el RMSE/Capacidad (Hoff et al., 2013) muestra que la dispersión de los datos satelitales frente a las mediciones en tierra es apenas del 12%.

La fuente de comparación más adecuada que se pudo encontrar en la literatura es el trabajo de Geiger y et al. (2008), en el cual se presenta la primera validación de los datos de LSA-SAF con mediciones en tierra en Europa. El sesgo absoluto calculado es inferior a 10W/m^2 y el RMSE es en general de 85 W/m^2 pero se mueve alrededor de 110W/m^2 para días de condiciones nubladas. Estos valores no contrastan fuertemente con los 15.22W/m^2 MBE y 121.2 RMSE de nuestro caso.

CONCLUSIONES

Aunque existe una clara deficiencia de datos de mediciones de radiación solar en tierra en el territorio argentino, existen fuentes de información derivadas de imágenes satelitales que pueden contribuir a mejorar la base de información nacional con respecto a radiación solar. Aparte de fuentes de información como las imágenes de los satélites GOES o servicio SWERA existen también productos como el SSRD del ECMWF y el DSSF de la LSA-SAF que poseen altas resoluciones temporales y espaciales aún no consideradas en la literatura científica nacional.

Los datos de ECMWF y LSA-SAF para el área geográfica del Valle de Lerma presentan fuertes similitudes entre sí tanto para datos diarios de energía solar acumulada, como para días típicos por mes y para series de tiempo con una resolución de 30 minutos. Esto invita a pensar en la posibilidad de usar datos del ECMWF para completar series de tiempo de imágenes el LSA-SAF cuando las mismas no estén completas.

La comparación de los datos de la LSA-SAF con las mediciones de un piranómetro dista de ser una validación óptima de la fuente, sobre todo considerando la complicada topografía de la zona. Sin embargo, los indicadores con valores cercanos a los usados para la validación de estas fuentes en Europa es un buen indicio de la exactitud del análisis. Los resultados alcanzados indican que los datos de LSA-SAF resultan una alternativa satisfactoria para compensar la escasa disponibilidad de datos en terreno del Valle de Lerma y podría considerarse para futuros trabajos de estimación de potencial fotovoltaico, entre otras aplicaciones.

En la agenda investigativa queda pendiente una validación de los datos de LSA-SAF para el resto del territorio argentino con datos disponibles. Igualmente sería pertinente hacer una diferenciación en las comparaciones en función de la hora y de la radiación solar diaria, ya que se esperarían mayores desvíos para las horas tempranas y tardías al igual que para días parcial o totalmente nublados. Adicionalmente sería importante la creación de un modelo para corregir los valores de ECMWF a los fines de completar series de tiempo incompletas o zonas del país sin datos satelitales LSA-SAF.

REFERENCIAS

Aristegui, R., y Righini, R. (2012). Discusión sobre el proceso de selección de sitios apropiados para la ubicación de estaciones de una futura Red Solarimétrica Nacional. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, *16, 39-46.*

Belmonte, S (2009). Evaluación multicriterio para el uso alternativo de energías renovables en la Ordenación Territorial del Valle de Lerma.” Tesis doctoral. Documento final y Cartografía digital.

Doctorado en Ciencias - Área Energías Renovables. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
Belmonte, S., Núñez, V., Franco, J., y Viramonte, J. (2006). Mapas de radiación solar para el Valle de Lerma (Salta–Argentina). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 10, 11–49.
Belmonte, S., Núñez, V., Viramonte, J. G., y Franco, J. (2009). Potential renewable energy resources of the Lerma Valley, Salta, Argentina for its strategic territorial planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 6–7.
Ceballos, J. C., Bottino, M. J., y Righini, R. (2005). Radiación solar en Argentina estimada por satélite: Algunas características espaciales y temporales. Congreso Argentino de Meteorología, Buenos Aires Argentina, Argentina. Octubre 2015
Ceballos, J. C., Lamelas, C. M., Forciniti, J. D., y Rodrigues, M. L. (2011). Radiación solar en la provincia de tucumán: una comparación entre valores estimados por satélite y medidos por una red solarimétrica. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 15, 71-78.
Crivelli E. y Pedregal M. A. (1972). Cartas de radiación solar global de la República Argentina. Meteorológica, III (1, 2, 3), 80-97.
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF (2015). ERA-Interim dataset (January 1979 to present). Descargado de: http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim el 10 de Junio de 2015.
Frulla, L. A., Gagliardini, D. A., Gallegos, H. G., Lopardo, R., y Tarpley, J. D. (1988). Incident solar radiation on Argentina from the geostationary satellite GOES: Comparison with ground measurements. Solar Energy, 41(1), 61–69.
Geiger, B., Meurey, C., Lajas, D., Franchistéguy, L., Carrer, D., y Roujean, J.-L. (2008). Near real-time provision of downwelling shortwave radiation estimates derived from satellite observations. Meteorological Applications, 15(3), 411–420.
Hoff, T. E., y Perez, R. (2010). Quantifying PV power Output Variability. Solar Energy, 84(10), 1782–1793.
Hoff, T. E., y Perez, R. (2012). Modeling PV fleet output variability. Solar Energy, 86, 8, 2177–2189.
Hoff, T. E., Perez, R., Kleissl, J., Renne, D., y Stein, J. (2013). Reporting of irradiance modeling relative prediction errors. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 21, 7, 1514-1519.
Grossi Gallegos H. (1998). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. Energías Renovables y Medio Ambiente 5, 33-42.
Grossi Gallegos, H. (1999) Comparación de los valores satelitales del “Surface Solar Energy (SSE) data set versión 1.0” con datos de tierra de la Red Solarimétrica. Energías Renovables y Medio Ambiente, 6, 1-6.
Inman, R. H., Pedro, H. T. C., y Coimbra, C. F. M. (2013). Solar forecasting methods for renewable energy integration. Progress in Energy and Combustion Science, 39, 6, 535–576.
INTA. (2015). La Argentina medirá la radiación solar en tiempo real. Descargado de: http://intainforma.inta.gov.ar/?p=28333 el 5 de Agosto de 2015.
Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., y Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. Descargado de: http://srtm.csi.cgiar.org
LandSAF. (2010). Product User Manual, Down-welling Shortwave Flux (DSSF). Descargado de: http://landsaf.meteo.pt/GetDocument.do?id=295 el 8 de Junio de 2015
Laspiur, R., Salazar, G. A., Zerpa, J., y Watkins, M. (2013). Trazado de mapas medios anuales de energía solar global, directa, difusa y tilt, usando la base de datos de SWERA. caso de estudio: provincias de Salta y Jujuy. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 17, 47-52
Raichijk, C. (2009). Comparación de valores satelitales de irradiación solar global con datos de tierra en la República Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 13, 11–07.
Raichijk, C. (2012). Control de calidad de mediciones de radiación solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 16, 17-22.
Raichjk, C., y Taddei, F. (2012). Estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 16, 23-29
Ramirez Camargo, L., Zink, R., y Dorner, W. (2015). Spatiotemporal modeling for assessing complementarity of renewable energy sources in distributed energy systems. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-4/W2, 147–154.

Ramirez Camargo, L., Zink, R., Dorner, W., y Stoeglehner, G. (2015). Spatio-temporal modeling of roof-top photovoltaic panels for improved technical potential assessment and electricity peak load offsetting at the municipal scale. Computers, Environment and Urban Systems, 52, 58-69.

Righini, R. (2004). Empleo de imágenes satelitales GOES 8 en el cálculo de la irradiación solar global en distintas zonas de Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 8, 2, 1-6.

Righini, R., Aristegui, R., y Roldán, A. (2014). Determinación de la cantidad de años de medición necesarios para la evaluación de la radiación solar global a nivel de superficie en Argentina, Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, 2, 17–25.

Righini, R., y Barrera, D. (2008). Empleo del modelo de Tarpley para la estimación de la radiación solar global mediante imágenes satelitales GOES en Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 12, 2, 9–15.

Righini, R., y Grossi Gallegos, H. (2000). Trazado de las cartas solarimétricas de la Pampa Húmeda empleando métodos geoestadísticos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 4,11-25.

Righini, R., y Grossi Gallegos, H. (2003). Aproximación a un trazado de nuevas cartas de irradiación solar para Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 7, 2, 11–07.

Righini, R., Grossi Gallegos, H., y Raichijk, C. (2005). Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. Renewable Energy, 30, 8, 1241–1255.

Roerink, G. J., Bojanowski, J. S., de Wit, A. J. W., Eerens, H., Supit, I., Leo, O., y Boogaard, H. L. (2012). Evaluation of MSG-derived global radiation estimates for application in a regional crop model. Agricultural and Forest Meteorology, 160, 36–47.

Salazar, G. A., Hernandez, A. L., Echazú, R., Saravia, L. R., y Romero, G. G. (2013). Comparison Between Measured Mean Monthly Solar Insolation Data and Estimates from Swera Database for Salta City (Northwestern Argentina). Electronic Journal of Energy y Environment, 1, 3, 9-20.

Sayago, S., Bocco, M., Ovando, G., y Willington, E. (2011). Radiación solar horaria: modelos de estimación a partir de variables meteorológicas básicas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 15, 51–57.

Taddei, F., Melendez, S., Cuestas, Y., y Collel, E. (2014). Resultados preliminares de la aplicación del algoritmo heliosat-2 para la estimación de la irradiación solar global a partir de imágenes satelitales goes-13 en la región de la pampa húmeda Argentina. Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, 2, 63-75.

AGRADECIMIENTOS: Este estudio fue desarrollado en el marco del proyecto Planificación Energética Territorial con Fuentes Renovables de Energía: Datos, metodologías, modelos y procesos de participación en los casos Argentino y Alemán financiado por el Ministerio Federal Alemán para la Educación y la Investigación (BMBF) y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MinCyt) argentino. Número de proyecto: 01DN14008. Adicionalmente, los autores le agradecen a Dr. A. Germán Salazar por proporcionar la serie de tiempo de las mediciones en tierra.

ABSTRACT

Global solar radiation is the most important factor to determine the energy generation potential of photovoltaic plants. In Argentina only a small number of ground measured data of global solar radiation exists. Researchers have to use statistical methods or satellite imagery to handle this lack of information and provide an estimation of solar global radiation in a certain location in the country. In this paper we explore global radiation data sources for the Valle de Lerma in order to define a data set for future studies of photovoltaic energy generation potential in the best possible spatial and temporal resolutions. We evaluate the global solar radiation data set from the ERA-INTERIM reanalysis provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the Meteosat second generation (MSG) derived data set from the Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LSA-SAF). These are compared with each other, with maps generated using statistical methods and with data from a piranometer. The results show that the data from LSA-SAF fit better to the ground measurements. This together with a high spatial and temporal resolution makes the LSA-SAF data a satisfactory alternative to compensate the lack of global solar radiation data available for the study area.

Keywords: global solar radiation, ECMWF, LSA-SAF, satellite imagery, comparison